

# 运用高速动态分析系统研究喷嘴雾化性能

王 玫, 李 鳌, 张志涛

中国航天科技集团公司第六研究院十一所

**摘 要:** 运用高速动态分析系统研究了喷嘴的雾化性能, 重点阐述了高速动态分析系统的原理、构成、工作方式及其在研究喷嘴雾化性能方面的应用。

**关键词:** 高速动态分析系统; 喷嘴; 雾化; 激光器; 高速摄影机

**中图分类号:** V432

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2004)02-0006-06

## 1 引言

喷嘴是推力室及燃气发生器的关键件, 其雾化性能是影响推力室和燃气发生器性能的关键因素之一。对喷嘴进行雾化性能研究, 提供其在给定条件下的喷雾场液滴尺寸及分布、运动速度、喷射角等性能参数分析、喷嘴工作的动态过程, 可以预估喷嘴的燃烧特性, 从而优化喷嘴设计; 对喷嘴进行雾化性能测试研究, 对发动机用喷嘴进行筛选, 从而保证发动机的可靠性及稳定性。

实验研究喷嘴雾化性能的技术很多, 热蜡技术、基于光散射原理的马尔文仪、基于多普勒效应的相位多普勒技术、激光全息技术、粒子场速度仪等技术都曾在喷嘴喷雾、燃烧研究领域等到了广泛应用。这些方法或技术都各自有其特点和优点, 但也有其不足之处。随着科学技术的日新月异, 喷嘴喷雾、燃烧特性研究的深入展开, 新的更先进的技术手段——高速摄影技术作为一种新的发展趋势, 开始在喷雾燃烧领域发挥作用。

## 2 高速摄影技术引进背景

激光全息技术是目前应用的较为成熟的研究喷嘴雾化性能的一种技术手段。激光全息是一种

用物体透射或反射的光的振幅、相位来记录物体像的技术, 在全息记录中, 利用两束光(参光和物光)的干涉现象把振幅和相位信息转换成强度的变化记录在介质——全息干版上, 其与图像处理系统相结合, 可以展示喷嘴的喷雾场粒子信息, 并可获得喷雾场粒子分布状况及性能参数。

近十年来, 我们一直应用双脉冲红宝石激光全息系统对喷嘴进行雾化性能分析, 为多种型号发动机喷嘴雾化性能研究工作发挥了重要作用。该系统用于研究喷嘴的瞬态雾化性能, 对喷嘴进行激光全息摄影, 经图像再现及数据图像处理获得雾化性能基本参数, 包括索特尔平均直径  $D_{32}$ 、体积平均直径  $D_{30}$ 、质量中径  $D_{mm}$ 、最大直径  $D_{max}$ 、颗粒尺寸分布、雾化角度、破碎长度等, 系统能分辨 15 微米以上的颗粒。

随着科学技术的飞速发展及对喷嘴雾化性能研究的进一步深入, 我们发现, 应用双脉冲红宝石激光全息系统对喷嘴进行雾化性能研究时, 工作效率比较低(作一个工况需要约半个小时), 其研究喷嘴的瞬态雾化性能是静态特性, 无法进行喷嘴的动态性能研究, 无法研究喷嘴喷雾场的动态变化过程, 对大流量的液/液喷嘴或气/液喷嘴既无法测量其雾化过程也无法展示其动态流动过程。而发动机喷嘴工作过程的状况, 直接决定着发动

收稿日期: 2003-09-29; 修回日期: 2003-10-24。

作者简介: 王玫(1972—), 女, 工程师, 研究领域为喷雾燃烧。

机工作的稳定性和可靠性。

高速摄影是一种对动态过程的快速摄影、慢动作回放过程。以激光作为光源，由高速摄影机及图像处理系统组成的高速动态分析系统，可对喷嘴进行喷雾燃烧动态发展过程进行研究。高速动态分析系统是对目前激光全息系统在喷雾研究领域的补充和完善，是目前激光全息系统的更新换代品，而在动态过程研究、燃烧过程研究及其他方面则是发展扩充。

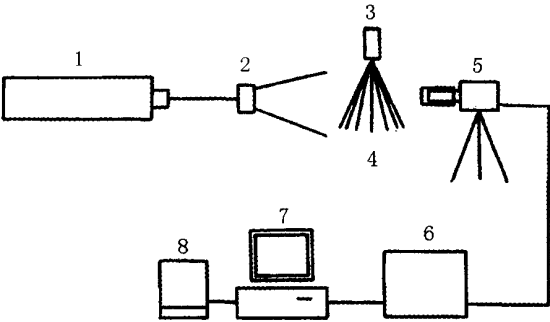
高速动态分析系统现已应用于喷嘴雾化性能分析工作中。

3 高速动态分析系统

3.1 高速动态分析系统组成及原理

高速动态分析系统主要由激光光源、高速摄影机、图像处理系统及其它辅助设备组成。

系统的结构原理图如图 1 所示。



1—激光器；2—光源附件；3—被试喷嘴；  
4—喷雾场；5—高速摄影机；6—存储控制器；  
7—分析计算机；8—打印机

图 1 系统的结构原理图

3.2 高速动态分析系统工作方式

高速动态分析系统有两种常见工作方式。一种方式是激光器与高速摄影机相对放置，激光光束经扩束后照射喷雾场；该方式一般测量稀薄喷雾场的粒径大小、运动速度和动态过程。另一种方式是激光器与高速摄影机垂直放置，激光光束经过片光源照射喷雾燃烧场；该方式一般测量稠密喷雾场的粒径大小、运动速度分布和动态过程，也可以测量喷雾场横截面的分布特性，这对研究

喷注器的喷雾场性能非常重要。

3.3 高速动态分析系统性能

3.3.1 喷嘴雾化性能快速测试

—— 进行喷嘴启动、关机瞬间喷雾场动态特性测试

—— 进行稳态喷雾场的快速测试诊断

快速测试稳态喷嘴喷雾场性能，测试稳态喷嘴喷雾场的动态变化过程，快速进行图像数据处理并提供雾化性能基本参数，包括索特平均直径  $D_{32}$ 、体积平均直径  $D_{30}$ 、面积平均直径  $D_{20}$ 、平均直径  $D_{10}$ 、颗粒尺寸直方图分布、雾化角度及变化范围、破碎长度及变化范围等。

3.3.2 高速流动过程跟踪分析

对气/液、液/液相互作用过程进行实时跟踪，展示液流破碎过程，测量破碎尺寸。拍摄速度达 10000FPS (Frame Per Second, 帧/秒)。

3.3.3 喷嘴动态性能研究

记录喷嘴喷雾场雾化角度、破碎距离、粒径分布等参数随时间的变化过程，记录喷雾场脉动频率低于 2000Hz 的动态雾化过程，研究喷嘴喷雾场脉动动态特性，详细展示喷嘴的启动和关闭瞬态过程。拍摄速度达 10000FPS。

3.3.4 燃烧过程研究

详细进行喷嘴的燃烧过程展示，研究喷嘴的燃烧特性。

3.4 高速动态分析系统与激光全息系统功能对比

双脉冲红宝石激光全息摄影系统专用于研究喷嘴的瞬态雾化性能，测试喷嘴喷雾场性能，进行数据图像处理后获得雾化性能基本参数，包括索特平均直径  $D_{32}$ 、体积平均直径  $D_{30}$ 、质量中径  $D_{mm}$ 、最大直径  $D_{max}$ 、颗粒尺寸分布、雾化角度、破碎长度等，系统能分辨 15 微米以上的颗粒。

高速摄影系统用于进行喷嘴的动态性能研究，研究喷嘴喷雾场的动态变化过程，对大流量的液/液喷嘴或气/液喷嘴既记录其动态雾化过程和其动态运动过程，且能快速处理喷雾场瞬态雾化性能，但分辨率较低。

高速动态分析系统与激光全息系统功能对比如下表 1 所示：

表 1 高速动态分析系统与激光全息系统功能对比

研究项目		激光全息摄影系统		高速动态分析系统	
		可否程度	达到指标	可否程度	达到指标
喷雾场瞬态及动态性能测试	喷嘴启动及关机过程研究	NO		YES	
	破碎长度	YES		YES	
	破碎长度动态变化过程	NO		YES	
	雾化角度	YES		YES	
	雾化角度动态变化过程	NO		YES	
	粒度大小及分布	YES	15um, 统计直径、尺寸分布	YES	144um(4540 相机 /Infinitt 镜头)
	粒度大小随时间的变化	NO		YES	144um(4540 相机 /Infinitt 镜头)
液/液, 气/液流动破碎过程研究	启动及关闭瞬间变化	NO		YES	全幅 4500FPS
	流场流动过程展示	NO		YES	全幅 4500FPS
粒子速度场测试	单幅图像液滴速度	YES	某一时刻单幅图像	YES	PIV 加高速相机
	单幅图像速度分布	NO		YES	软件快速自动全场显示
	场速度随时间变化	NO		YES	快速自动全场显示
燃烧过程展示		NO		YES	全幅 4500FPS

4 高速动态分析系统实际应用

应用高速动态分析系统，我们已进行了若干喷嘴的雾化性能研究实验。首先打开蒸汽激光器，至正常工作状态；根据试验具体要求安装合适的高速摄影机镜头；连接高速摄影机及存储器、计算机；寻找拍摄目标进行拍摄；随后应用 VISI-Size 或 PIV 软件对图像进行数据处理。在实际应用过程中，曾碰到了诸如激光能量较大，对高速摄影机镜头损伤较大，喷雾场光线较强；高速摄影机难于聚焦喷雾场等实际应用问题，采取了装激光能量衰减板、加适当背光屏等措施加以解决。拍摄了自击式喷嘴、离心式喷嘴的启动、关机过程、喷雾场横截面图等，并对喷嘴在给定条件下，拍摄喷雾场图像应用 VISI-Size 及 PIV 软件进行数据处理，获得索特平均直径 D32、体积平均直径 D30、面积平均直径 D20、平均直径 D10、破碎长度等雾化性能参数。通过分析对喷嘴性能作出评定，对喷嘴的设计提出了良好的建议；还对喷嘴的加工质量进行评定。下图（图 2—图 5）是应用

高速动态分析系统拍摄的喷雾动态展示图像及全场图、横截面图。

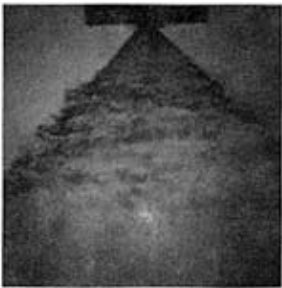


图 2 离心式喷嘴全场图

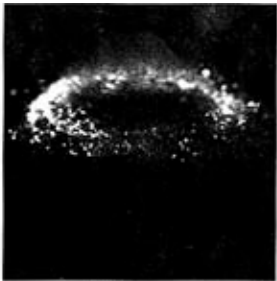


图 3 离心式喷嘴横截面图

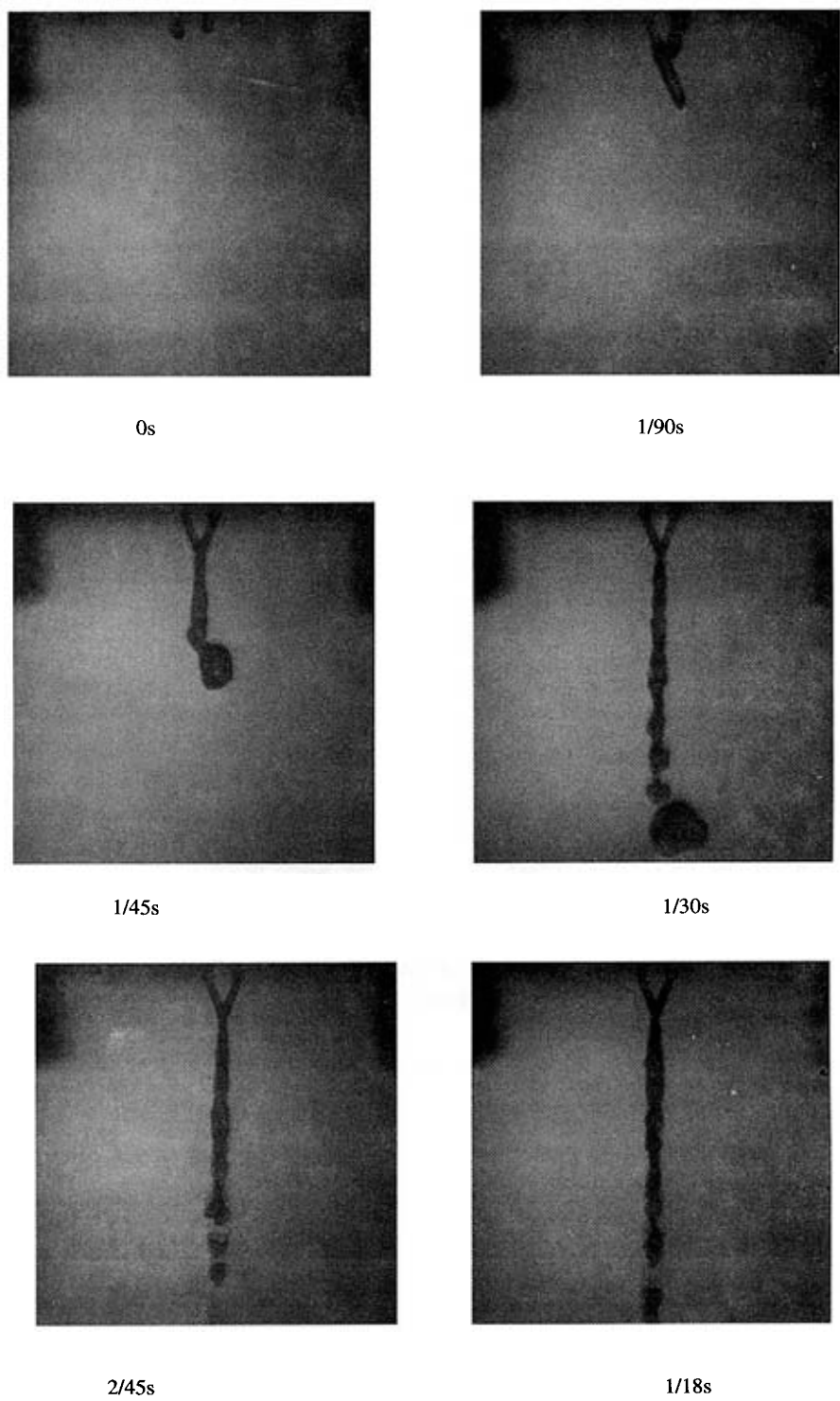
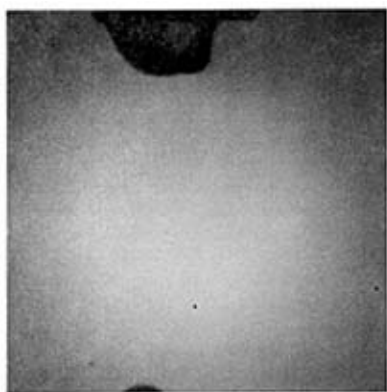


图 4 直流自击式喷嘴启动过程



0s



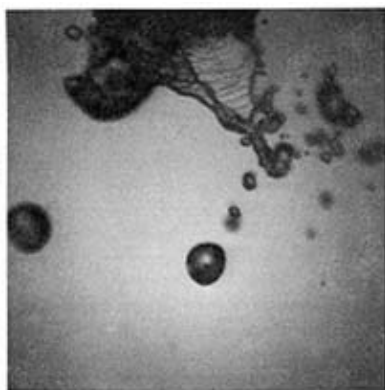
7/90s



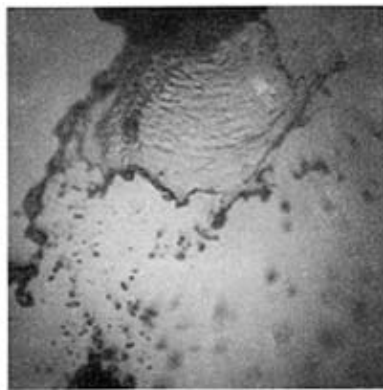
7/45s



7/30s



14/45s



7/18s

图 5 离心式喷嘴启动过程

5 结束语

高速摄影技术应用于喷嘴燃烧、雾化性能研究具有广阔的发展前景，是未来的发展趋势。高速动态分析系统属于国内外喷嘴雾化、燃烧性能

研究领域非常先进的技术设备之一，具有国际先进水平。该系统的建成，使我所喷嘴雾化、燃烧内过程研究条件完成了一次飞跃。该系统的投入使用将为我所液体火箭发动机喷嘴优化设计、质量评估提供具有重要价值的性能参数。

\*\*\*\*\*



NASA 将在年底提出新的火箭助推器方案

NASA 已开始多项研究以决定是否将需要一种新型大推力上面级火箭，作为新的月球及火星飞船的推进系统。这是布什总统提出的新的美国航天政策的一部分。

这些研究将有助于在今年底决定运载火箭的大小及运载能力。这种火箭必须能够适用于布什提出的新的航天计划下的有效载荷的发射。这项决定与 NASA 在 1962 年所面临的选择相似，当时曾提议研制新的火箭发射阿波罗飞船及其组件。

为了满足需求并保证低成本，航天计划人员正密切关注无人型航天飞机，它将取代有翼航天飞机货物轨道器，这种运载工具可将 100000 磅或更重的货物送入轨道，同时仍将使用已有的发射设施、机库和受过训练的并从事载人航天飞机工作的人员。

NASA 及其工业小组正在研究有关航天飞机货物飞船的几种方案。一种方案建议将波音公司造的“亚特兰蒂斯”号、“发现”号和“奋进”号航天飞机改装成不载人的机器人控制飞船。去掉生命保障和其他人员维持设备，改进后的航天飞机将具有额外的 25000 磅或比目前限定的 55000 磅更大的运载能力。这种机器人航天飞机也可以运送用于搬运货物和与空间站对接的机器人臂。

其余设计方案建议继续采用洛马公司提供的航天飞机外燃料箱和 ATK 公司由聚硫橡胶制成的固体助推器火箭，但将增加一附加助推器舱段，提高火箭的推力。

航天计划人员完成全部的设计研究后，将可能提出由德尔它、宇宙神和改进的航天飞机大型货运火箭组合成几种火箭飞船（rocketships）的设计方案。